

# ИНДУКЦИОННЫЙ МГД-НАСОС С ПЛОСКИМИ КАТУШКАМИ

Тарасов Ф.Е., Бычков С.А., Назаров С.Л., Фризен В.Э.

ФГАОУ ВПО УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

**Аннотация** - В статье приведены результаты компьютерного моделирования индукционного магнитогидродинамического насоса для транспорта легких цветных металлов. Обосновывается выбор конструкции обмоток насоса.

**Ключевые слова** – МГД-насос, линейный асинхронный двигатель (ЛАД), плоская катушка, обмотка, фактор нагрева.

## ВВЕДЕНИЕ

Для транспортировки жидкого металла в литейных установках в ряде случаев удобно использовать индукционные МГД-насосы. Технологическая цепочка для процесса литья в кристаллизатор скольжения с подачей металла МГД-насосом изображена на рис. 1. При этом к насосам предъявляются повышенные требования

по надежности, поскольку в случае неисправности насоса отливаемый слиток отбраковывается.

Из основных требований к насосам для литейных машин можно выделить следующие:

1. Малые габариты (ограничены расстоянием от стенки металлургической емкости до литейной машины);

2. Относительно высокое развиваемое усилие (оно определяет максимальный напор насоса);

3. Высокие рабочие температуры обмоток (металлотракт должен располагаться как можно ближе к активной части магнитной системы, а возможности теплоизоляции и охлаждения обмоток в условиях металлургического производства ограничены);

4. Конструктивная простота, легкость монтажа и обслуживания.

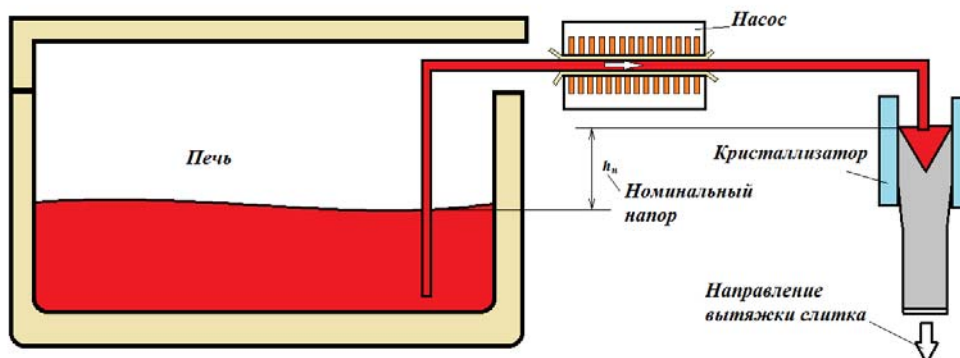


Рис. 1. Технология полунепрерывного литья в кристаллизатор скольжения

Исходя из вышеперечисленных требований сформировалась конструкция плоского линейного индукционного насоса (ПЛИН), которая применяется в данный момент на ряде металлургических предприятий для литейного производства (рис. 2). Насос представляет собой двухсторонний линейный асинхронный двигатель ЛАД с жидкометаллическим вторичным элементом, индуктор которого создает бегущее вдоль оси металлотракта поперечное (пронизывающее металлотракт) магнитное поле.

## СРАВНЕНИЕ СХЕМ ОБМОТОК ПЛИН С РАЗЛИЧНЫМ ЧИСЛОМ ПОЛЮСОВ

Представляет определенный интерес сравнение эффективности схем обмоток, которые можно расположить в заданных габаритах насоса.

Для сравнения были выбраны схемы с различным числом полюсов ( $2p$ ) с полным и укороченным шагом, с однослойными и двухслойными катушками. Расчетная модель была создана в программе Elcut, учитывающая в двумерной постановке продольный краевой эффект. Для учета поперечного краевого эффекта вносилась поправка в электропроводность вторичного элемента [1].

Увеличение полюсного деления ( $\tau$ ) неоднозначно влияет на тяговое усилие машины. С одной стороны увеличение полюсного деления приводит к снижению относительного зазора машины, что повышает коэффициент мощности. С другой стороны увеличение полюсного деления при фиксированной ширине машины уменьшает ее относительную ширину, усиливая влияние поперечного краевого эффекта, который в свою очередь приводит к снижению коэффициента полезного действия и тягового усилия машины.

Поэтому имеет определенный смысл провести исследование влияния числа полюсов на характеристики ПЛИН при заданных габаритах насоса. Сравнение проводилось для трех вариантов

машины – базового варианта с 6-ю полюсами, а так же 4-х и 2-х полюсных.

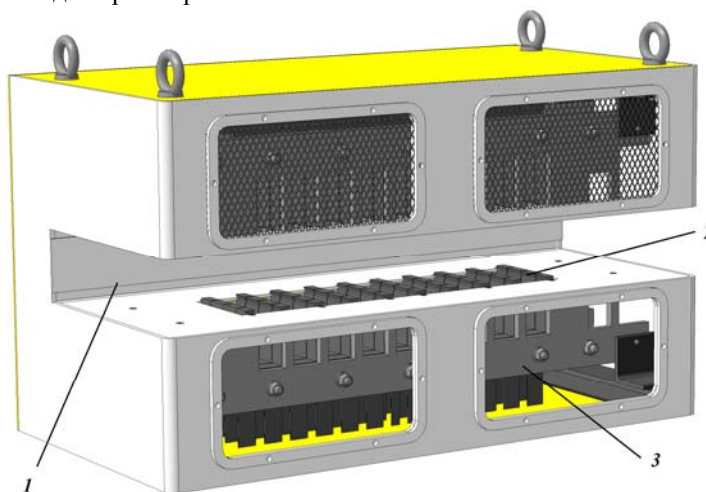


Рис. 2. Конструкция насоса:  
1 – проем для установки металотракта; 2 – активная поверхность индуктора;  
3 – магнитопровод нижней части ЛАД

Сопоставление вариантов проводилось при фиксированном значении фактора нагрева:

$$AJ = A \cdot J \quad (1)$$

где:  $A$  – линейная нагрузка машины;  
 $J$  – плотность тока проводника обмотки.

Равенство фактора нагрева для всех индукторов соответствует равенству потерь в обмотке. При этом плотность тока принималась равной  $1.76 \text{ A/mm}^2$ .

В модели была учтена стенка канала насоса толщиной  $1 \text{ мм}$ , выполненная из немагнитной стали. На данном этапе не учитывались конструктивные особенности обмоток индуктора, такие как, например, взаимное расположение лобовых частей обмоток, а также катушечная и витковая изоляция проводников.

Учет поперечного краевого эффекта осуществлялся изменением проводимости  $\gamma$  металла в канале. Пересчет осуществлялся по следующей формуле [1]

$$\gamma_{\Sigma} = \gamma k_{Pt}; \quad k_{et} = 1 - \frac{\text{th} \alpha \frac{L}{2}}{\alpha \frac{L}{2}} = k_{Pt} \quad (2)$$

где:  $\alpha = \pi/\tau$ ,  $\tau$  – полюсное деление;  $L$  – ширина активной части.

На рис. 3 представлены распределения магнитного поля трех вариантов насоса, на рис. 4 приведены картины распределения тока по сечению вторичного элемента для тех же вариантов обмоток. Результаты расчета приведены в табл.1. Как видно уменьшение числа пар полюсов при постоянной длине машины приводит к значительному увеличению усилия.

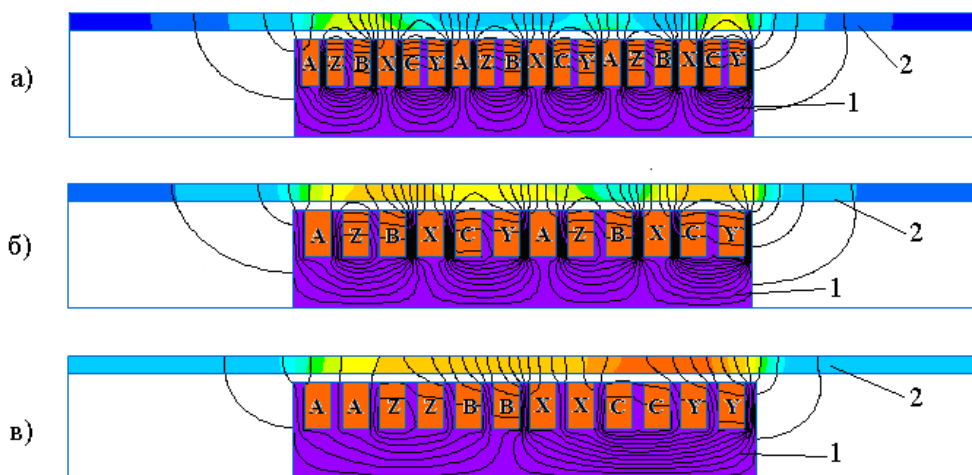


Рис. 3. Картина распределения поля в индукторах с различным числом полюсов:  
а –  $2p = 6$ ; б –  $2p = 4$ ; в –  $2p = 2$ ; 1 – индуктор; 2 – канал с жидким металлом

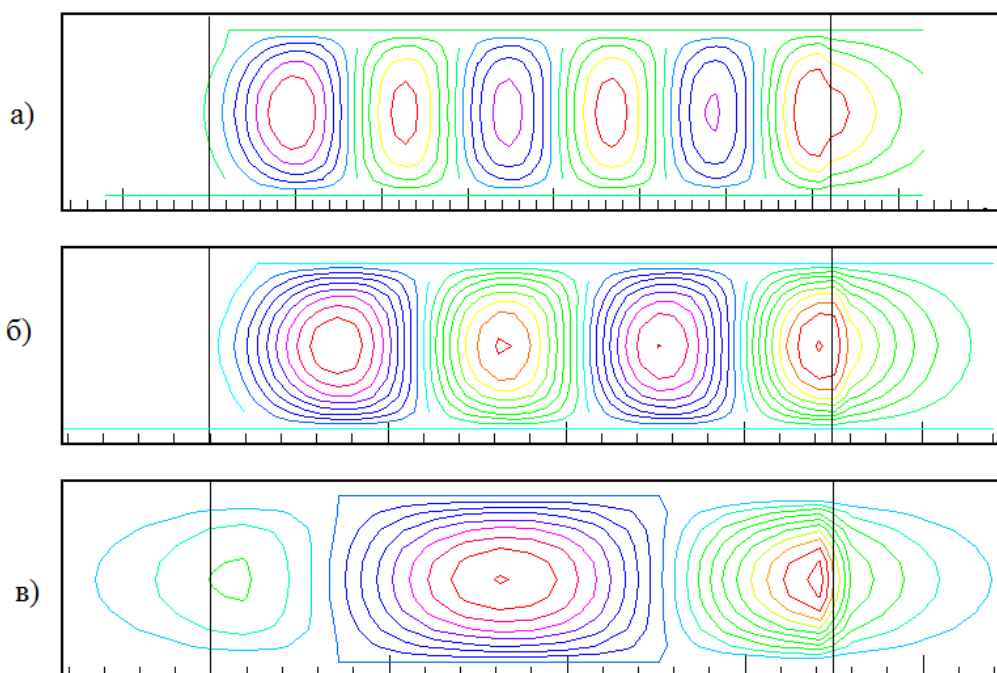


Рис. 4. Распределения вторичных токов: уменьшение числа полюсов приводит к увеличению продольной составляющей вторичных токов и уменьшению поперечной составляющей – создающей тяговое усилие.

а)  $\tau = 60$  мм,  $q = 1$ ; б)  $\tau = 90$  мм,  $q = 2$ ; в)  $\tau = 180$  мм,  $q = 2$

Таблица 1

Тип обмотки	Число полюсов	Число пазов	Число пазов на полюс и фазу	Проводимость ВЭ, МСм/м	Коэффициент поперечного краевого эффекта	Максимальная индукция в зубце, Тл	Плотность тока, А/мм <sup>2</sup>	Линейная нагрузка, А/м	Усилие, Н
ДШ-1-60	6	18	1	3,1	0,621	0,68	1,76	46,8	11,5
ДШ-1-60	4	12	2	3,1	0,459	0,64	1,76	46,8	27,3
ДШ-1-60	2	12	2	3,1	0,192	1,02	17,6	46,8	75,6

В таблицах приведено следующее обозначение типа обмоток: первая буква – количество слоев (Д – двухслойная; О – однослойная; Ш – шаблонная; Б – барабанная; К – концентрическая; первая цифра – шаг обмотки; 2 группа цифр – величина фазной зоны, мм).

Как видно из результатов расчета, приведенных в таблице, даже при практически трехкратном снижении эффективной проводимости вторичного элемента, вызванным влиянием поперечного краевого эффекта, наибольшее усилие дает двухполюсный индуктор, при этом по

сравнению с 6-ти полюсным прототипом усилие возрастает почти в 7 раз.

#### СРАВНЕНИЕ СХЕМ ОБМОТОК С РАЗЛИЧНЫМ ОТНОСИТЕЛЬНЫМ ШАГОМ И ЧИСЛОМ ЗОН

Как уже отмечалось ранее, насос должен обеспечить достаточную надежность работать в крайне тяжелых для изоляции условиях. При длительной непрерывной работе температура активной части насоса (зубцы магнитопровода, части обмоток, расположенные в пазах магнитопровода) становится сопоставимой с температурой металла в канале (в рассматриваемом случае жидкого магния  $\sim 750$  °С). Таким образом основная сложность состоит в обеспечении надежной изоляции обмотки работающей при таких температурах. В существующем насосе такая изоляция выполняется на основе стекло-слодяных лент. При этом надежность такой изоляции невысока. Отмечались случаи выхода из строя насоса по причине повреждения изоляции в течении нескольких часов непрерывной работы. Предлагается обеспечить повышение надежности изоляции 2-я путями: использованием новых высокотемпературных изоляционных материалов и применением предельно простой формы катушек обмотки. Последнее обстоятельство упрощает технологию наложения изоляции и снижает возможность брака при производстве. Наиболее пригодными для обеспечения вышеуказанных требований являются 2-х слойные концентрические обмотки, катушки которых могут быть выполнены плоскими без изгиба лобовых частей.

Такие обмотки могут быть выполнены, как 6-ти так и 3-х зонными, при этом 6-ти зонные обмотки с плоскими катушками могут быть реализованы только с частичным заполнением пазов. Поэтому был проведен ряд расчетов 6-ти и 3-х зонных обмоток с различным числом пазов на полюс и фазу  $q$  и различным относительным шагом

$\beta$ . Расчеты проводились без учета изоляции. В качестве базового варианта принималась 6-ти зонная шаблонная 2-х слойная обмотка с полным шагом. Распределение магнитного поля для рассмотренных вариантов приведено на рис. 5. Результаты расчета приведены в табл. 2.

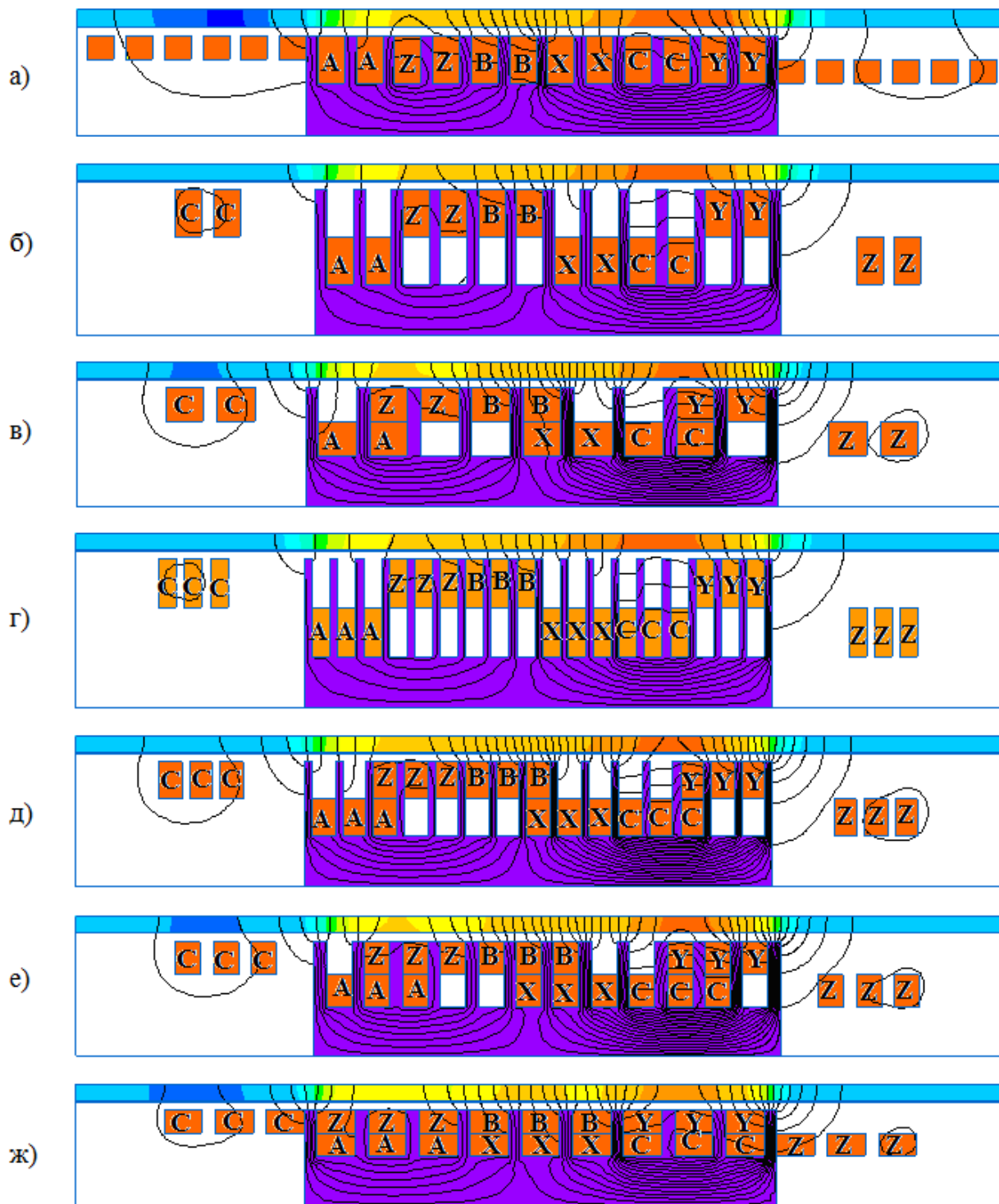


Рис. 5. Картина распределения поля в индукторах с плоскими катушками различной конструкции

Как и при проведении предыдущего вычислительного эксперимента, сравнение различных вариантов осуществлялось при фиксированном значении фактора нагрева, плотности тока в проводниках и длины индуктора. Поэтому при изменении конструкции обмоток – числа зон, числа пазов на полюс и фазу, относительного шага обмоток и т.д., производилось изменение геометрии паза таким образом, чтобы фактор нагрева оставался неизменным.

Наихудший результат дали 3-х зонная обмотка и 6-ти зонная обмотка с полным заполнением пазов. Остальные варианты дали

близкие значения усилия 60-70Н. Наибольшие значения усилия дают обмотки с полным шагом (рис. 5, б, г). Укорочение шага (рис. 5, в, д, е) обмотки приводит к снижению усилия. Помимо величины усилия в расчетах определялась максимальное значение индукции в основании зубца. В этом отношении индуктор с обмоткой с полным шагом и  $q=3$  (рис. 5, г) а так же индуктор с обмоткой с укорочением 5/7.5 и  $q=3$  (рис. 5, д) будут входить в насыщение. По этой причине эти варианты были исключены. Помимо величины усилия при выборе типа обмотки оценивалось технологичность и стоимость изготовления насоса.

Таблица 2

Тип обмотки	Рисунок	Число полюсов	Число пазов	Число пазов на полюс и фазу	Коэффициент поперечного краевого эффекта	Максимальная индукция в зубце, Тл	Плотность тока, А/мм <sup>2</sup>	Линейная нагрузка А/м	Усилие, Н
ДШ-1-60	5, а	2	12	2	0,192	0,88	1,76	46,8	81,2
ДК-1-60	5, б	2	12	2	0,192	1,37	1,76	46,8	70,5
ДК-3/4.5-60	5, в	2	9	2	0,192	1,11	1,76	46,8	59,2
ДК-1-60	5, г	2	18	3	0,192	1,83	1,76	46,8	72,8
ДК-5/7.5-60	5, д	2	15	3	0,192	1,49	1,76	46,2	63,8
ДК-2/3-60	5, е	2	12	3	0,192	1,05	1,77	46,2	55,5
ДК-1-120	5, ж	2	12	3	0,192	1,10	1,76	46,8	37,5

Поскольку рассматриваемые машины предполагается изготавливать малыми сериями, традиционный способ производства магнитопровода штамповкой неприемлем по экономическим соображениям. Для изготовления листов магнитопровода предполагается использование технологии лазерной или электроэрозионной резки. При этом стоимость работы пропорциональна длине реза. В этом отношении более выгодным является индуктор с наименьшим числом пазов. Среди рассмотренных вариантов наименьшее число пазов имеет обмотка с  $q=2$  и укорочением 3/4.5 (рис. 5, в). По величине усилия она проигрывает только обмотке с  $q=2$  и полным шагом. Однако величина усилия

составляет 59.2 Н что фактически в 6 раз больше усилия прототипа. Выбранные для дальнейшего исследования схемы обмоток в табл. 2 выделены цветом.

#### СРАВНЕНИЕ НАИЛУЧШИХ ВАРИАНТОВ

Наилучшие варианты далее исследовались более подробно. В скорректированной модели было учтено снижение линейной нагрузки при уменьшении сечения проводников обусловленного наличием катушечной изоляции (рис. 6). Толщина изоляции принималась равной 2мм на сторону. Расчет проводился так же и для насоса прототипа. Результаты сведены в табл. 3.

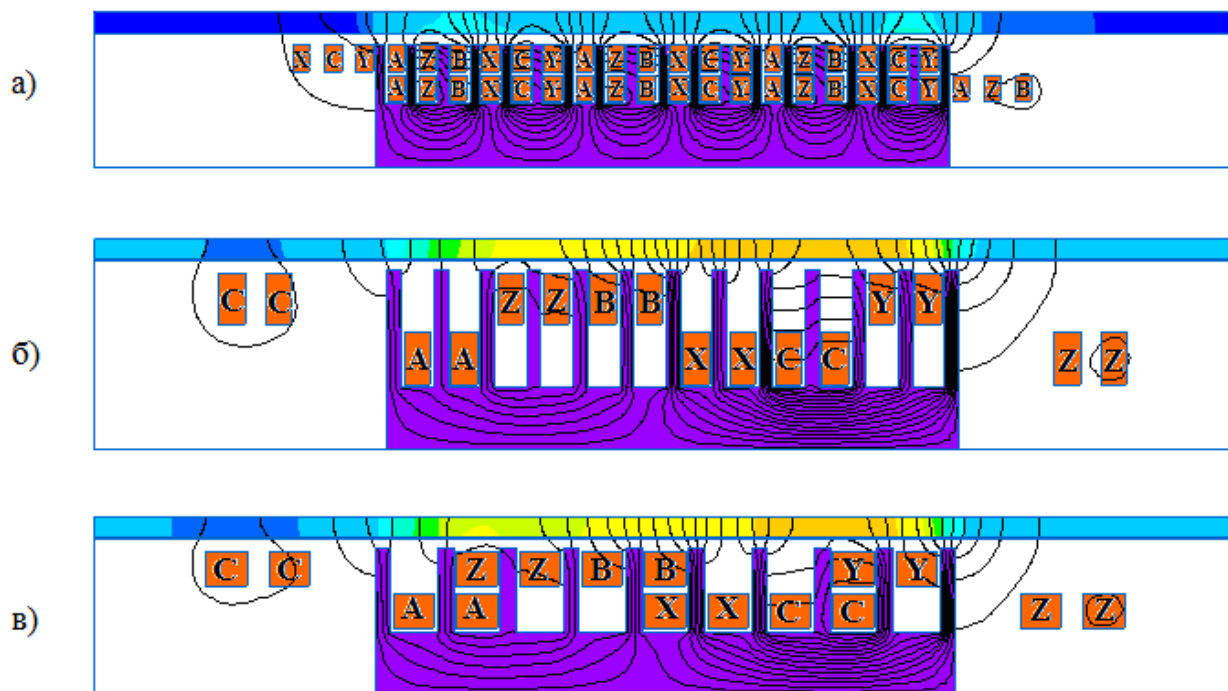


Рис. 6. Картина распределения поля в индукторах с наилучшими показателями (б и в), а также в индукторе прототипа (а)

Таблица 3

Тип обмотки	Рисунок	Число полюсов	Число пазов	Число пазов на полюс и фазу	Коэффициент поперечного краевого эффекта	Максимальная индукция в зубце, Тл	Плотность тока, А/мм <sup>2</sup>	Линейная нагрузка А/м	Усилие, Н
ДШ-1-60	6, а	6	18	1	0,621	0.51	1.76	32.9	5.7
ДК-1-60	6, б	2	12	2	0,192	1.00	1.76	33.9	37.2
ДК-3/4.5-60	6, в	2	9	2	0,192	0.83	1.76	34.2	32.0

При сравнении результатов расчета, приведенных в табл. 2 и 3 для машин с аналогичными типами обмоток, видно, что учет изоляции существенно снижает расчетную линейную нагрузку и электродинамическое усилие, развиваемое в канале. Так же становится очевидным, что различие в усилиях 2-х слойных обмоток при учете в модели катушечной изоляции становится не столь существенным по сравнению с приведенным в табл. 2, где изоляция катушек не была учтена.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о целесообразности применения в плоских индукционных машинах с плоскими катушками схем обмоток с полузаполненными

пазами как с полным, так и с укороченным шагом обмоток. Анализ достаточно широкого спектра вариантов обмоток с различным числом зон, пазов на полюс и фазу, относительным шагом и т.п. позволяет при ограниченных габаритах машины сделать выбор в пользу схемы обмотки с  $q=2$  и укорочением 3/4.5 (рис. 6, в). Приведенные выше результаты исследования легли в основу заявки на изобретение «Двухслойные концентрические обмотки с плоскими катушками», поданную авторами в 2013 г.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Линейные асинхронные двигатели/ О.Н. Веселовский, А.Ю. Коняев, Ф.Н. Сарапулов. – М.: Энергоатомиздат, 1991 г